

DOI: 10.5846/stxb201301010007

于明含, 孙保平, 胡生君, 王慧琴, 赵岩. 退耕还林地结构与生态功能的耦合关系. 生态学报, 2014, 34(17): 4991-4998.

Yu M H, Sun B P, Hu S J, Wang H Q, Zhao Y. Modeling the degree of coupling and interaction between forest structure and ecological function in a grain for green project, Shanxi, China. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(17): 4991-4998.

退耕还林地结构与生态功能的耦合关系

于明含, 孙保平*, 胡生君, 王慧琴, 赵 岩

(北京林业大学 水土保持学院 荒漠化防治重点实验室, 北京 100083)

摘要:退耕还林的林地结构与生态功能效益是退耕还林工程的关键性问题。基于典型黄土高原丘陵沟壑地 7 种代表性的退耕还林模式的野外调查和取样分析结果, 选取 14 个林地结构因子和 2 个代表性生态功能因子, 对林地结构进行因子分析, 并构建了林地结构与生态功能的灰色关联度模型和耦合协调度模型。用建立的模型分析吴起县退耕还林地 7 种模式的林地结构、土壤侵蚀及地表径流数据, 结果表明, 不同林地结构因子间相关度不同, 经过主成分分析降维为 4 个主成分因子, 分别反映了林分的乔木层结构指标、上层结构生物量指标、土壤层指标及其它指标; 不同林地结构因子与生态功能的关联度系数不同, 林地结构因子对地表径流的影响明显高于对土壤侵蚀率的影响, 其中林分组成对径流的影响最明显, 土壤因子影响最不明显; 草本层生物量、枯落物生物量等近地表的相关结构对土壤侵蚀的作用明显。不同退耕还林模式的林地结构与生态功能的耦合协调度状况都不良好, 仍需要进行调整和改善。

关键词:退耕还林; 林地结构; 生态功能; 因子; 耦合

Modeling the degree of coupling and interaction between forest structure and ecological function in a grain for green project, Shanxi, China

YU Minghan, SUN Baoping*, HU Shengjun, WANG Huiqin, ZHAO Yan

Key Laboratory of Soil and Water Conservation Combating of Ministry of Education, College of Soil and Water Conservation, College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: Forest structure and ecological function serve important roles in China's Grain for Green project. This paper analyzes seven grain for green patterns in the Loess Plateau Gully and Hill Region using data analysis and modeling. Fourteen forest structure factors and two ecological function factors were selected for analysis; these factors were reduced dimensionally using factor analysis, and models of the degree of coupling and interaction between forest structure and ecological function were constructed. Based on the model, analysis of data related to forest structure, soil erosion and runoff was completed for the Grain for Green project in Wuqi County, Shanxi Province, China. The results reveal various relationships exist between the different forest structural factors analyzed here. All the factors can be reduced dimensionally into four main factors identified here as F1, F2, F3, and F4. These four factors represent the tree layer, upper canopy layer mass, soils and an alternative factor, respectively. A component score coefficient matrix in the Grain for Green patterns was obtained by multiplying the factor coefficient and the corresponding basic data, and then combining the scores to calculate a component score. Each forest structural feature was expressed using the component score coefficient matrix, which shows that two types of forests, pure *Robinia pseudoacacia* and mixed *Robinia pseudoacacia* / *Fructus Hippophae* had the highest F1 score; pure *Caragana intermedia* forest had the highest F2 score; and pure *Fructus Hippophae* forest had the highest F3

基金项目: 国家“十一五”科技支撑项目 (2006BAD26B0702)

收稿日期: 2013-01-01; 网络出版日期: 2014-03-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sunbp@163.com

score. The coupling degree of the Grain for Green patterns differed between different models, and the integrative indices of forest structure did not correlate well with those of ecological function. The integrated index measuring the relationship between ecological function and surface runoff is larger than the index measuring the relationship between ecological function and soil erosion. Forest component factors have the most obvious effect on ecological function, and the effect of the soil factor is the least obvious. The mass of herb layer, litter layer and some other structures near the ground play the main role in the ecological function of controlling soil erosion. The relationships of forest structure and ecological function in the grain for green project differ in the various patterns. Forest structure and ecological function were most closely related in areas with pure *Fructus Hippophae*, while index score belongs to the middle coupling coordinative level. *Pinus tabulaeformis* had the least interaction between forest structure and ecological function. Calculating the score for all types of models discussed above shows a measure of the degree of interaction between the forest structure and ecological functions can be measured with a score of 0.6, which is considered to indicate a weak interaction. Therefore, forest structure and ecological function should be improved during the application of any Grain for Green project in the Loess Plateau Gully and Hill Region.

Key Words: grain for green projects; forest structure; ecological function; factor; coupling

耦合是近年来应用频率比较高的专业术语之一,逐渐被应用于农业、生物、生态、地理等学科的研究中。将耦合的概念引入到生态学研究领域具有重要的创新意义,它强调的是一种深层次的因子之间关系及过程的研究,为揭示生态系统的协同、约束关系提供了理论基础。黄土高原丘陵沟壑区位于我国西北部,该区沟壑发育,沟道侵蚀十分严重,土壤浅薄,水土流失问题严峻。造成水土流失的原因除原有地形、土壤、气候因素外,土地的不合理利用、植被破坏也是一个重要原因,植被具有减少径流、防治侵蚀的作用,所以植被建设是治理水土流失和改善生态环境的根本措施。2001年起黄土高原全面实施退耕还林还草工程,旨在改善黄土高原日益恶化的生态环境,建立起稳定的生态系统以实现环境的可持续发展。该系统中,植被和土壤是改善生态最重要的两个影响因子,它们对于退耕还林地减少径流和保持水土等生态效应有直接的作用。

在退耕还林工程的生态效应研究中,多数研究致力于探索不同退耕模式的配置,以期使退耕地有效的实现保持水土、涵养水源等功能。如不同尺度退耕还林地工程效益的评价^[1-3],不同退耕模式间的对比^[4-5],以及典型地区退耕还林工程与土壤、水文、微生物等单一生态因子的效应等^[6-8],这些研究多采用定性的方法或简单的单因子分析进行描述,很少通过探索多因子之间的相互作用进而理解林地的生态效应。本文将系统耦合概念引入退耕还林工程的问题探讨中,通过灰度关联分析的方法研究林地结

构与生态功能间的关系,并建立耦合模型,以期探索一种综合的退耕还林林地结构与生态功能的评价方法,并以此为基础对各退耕模式进行综合分析,进而为提高退耕还林经营水平、增强其生态效益提供理论指导。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

吴起县位于延安市西北部,地理坐标为 107°38'57"—108°32'49"E, 36°33'33"—37°24'27"N, 总面积 3791 km², 主要地貌类型为黄土高原梁状丘陵沟壑区。该县地处中温带气候区,属典型的中温带大陆性季风气候,年平均气温 7.8℃,降雨量少,多年平均降雨量为 478.3 mm,降雨分布不均匀,主要集中在 7—9 月份,降雨量为 301.7 mm,年蒸发量为 891.23 mm,无霜期短,平均为 147 d。本次研究区域为退耕还林 10 年的林地,样地选择基本满足坡度坡向一致,土壤类型主要为黄土,土层厚度约 60 cm。该地区退耕地主要退耕模式主要有 7 种,分别为沙棘(*Fructus Hippophae*)、柠条(*Caragana intermedia*)、刺槐×沙棘(*mixing Robinia pseudoacacia with Fructus Hippophae*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、沙棘×山杏(*mixing Siberian Apricot with Fructus Hippophae*)、山杏(*Siberian Apricot*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)等。

1.2 研究方法

本研究以吴起县林龄为 10 a 的 7 种配置模式的退耕还林地为研究对象,通过实地的样方调查及实

验分析,获取所需的生物量及土壤数据。从中选取研究所需的林地结构因子,利用主成分分析法将因子降维,根据灰度关联模型理论建立林地结构与生态功能互相匹配的关联度矩阵,进而建立林地结构与生态功能的耦合度模型,然后再此基础上测算吴起县 7 种主要退耕还林类型的林地结构与生态功能系统耦合态势。为保证模型的可靠度,本研究每种退耕类型的结构与生态因子调查 6 个重复样本进行分析。

1.2.1 耦合关系因子的确定

整合已有林地结构与功能关系的研究发现,森林生态系统的水文过程明显地受森林枯落物与土壤特征^[9-11]、森林类型和郁闭度^[12-14]、林冠特征^[15-16]、年龄阶段^[17-18]、生物量^[19]等多方面因素的影响,本研究在因子选择中借鉴前人研究为基础,基于全面性的考虑进行因子选择。本次调查林分为同龄林,所以林分年龄不作为耦合因子。

本研究选择林地林分组成、郁闭度、平均高度、平均胸径、枝叶生物量、根系生物量、草本生物量、枯落物生物量等 8 个林分结构因子,土壤总孔隙度、土壤毛管孔隙度、土壤稳渗速率等 3 个土壤因子,冠层截留率、草本层截留率、枯落物含水量等 3 个林地水文因子,共 14 个表征林地特征的结构因子;选取地表径流量、土壤侵蚀量等 2 个生态功能因子,以研究该地区退耕还林地结构与生态功能的关系。

1.2.2 耦合关系模型数据处理

研究数据中,如林分组成结构因子是非数值型数据,需要将其转化为数值型数据,进行量化处理(表 1)。

鉴于指标的原始数据量纲不同,在关联分析之前,采用区间标准化的方法对数据进行无量纲化处理。

$$\xi_i(j)(k) = \frac{\min_i \max_j |Z_i^L(k) - Z_j^L(k)| + \rho \min_i \max_j |Z_i^L(k) - Z_j^L(k)|}{|Z_i^L(k) - Z_j^L(k)| + \rho \min_i \max_j |Z_i^L(k) - Z_j^L(k)|} \quad (3)$$

式中, L 表示林地结构因子要素, $Z_i^L(k)$ 是第 k 个样本点的林地结构系的第 i 个指标标准化值;类似地, I 表示生态功能因子要素, $Z_j^I(k)$ 是第 k 个样本点的生态功能的第 j 个指标标准化值。 ρ 为分辨系数,是 0 与 1 之间的数,在观测序列没有强烈干扰的情形下,一般取值为 0.5。 $\xi_i(j)(k)$ 是第 k 个样本点的单指标

$$Z_{ij} = (X_{ij} - \min_i X_{ij}) / (\min_i X_j - \min_i X_{ij}) \quad (1)$$

表 1 数据标准化处理

Table 1 Standardization of data processing

标准化值 Standardized value	林分组成结构因子 Forest structure factors
1	纯林 Pure forest
2	混交林 Mingled forest

1.2.3 林地结构因子分析

采用主成分分析的方法,找到影响林地结构的主成分因子,用较少的变量来研究影响退耕还林地的生态功能的林地结构因子。

选择线性结构计算因子得分来描述不同退耕地的林地结构特点,计算表达式如下:

$$Q = m_1 x_1 + m_2 x_2 + \cdots m_n x_n \quad (2)$$

$$\begin{cases} m_{11}x_1 + m_{12}x_2 + \cdots + m_{1n}x_n \\ m_{21}x_1 + m_{22}x_2 + \cdots + m_{2n}x_n \\ m_{31}x_1 + m_{32}x_2 + \cdots + m_{3n}x_n \\ \vdots \\ m_{p1}x_1 + m_{p2}x_2 + \cdots + m_{pn}x_n \end{cases}$$

式中, Q 为因变量, $x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n$ 自变量, $m_1, m_2, m_3, \cdots, m_n$ 为自变量系数。

模型表达式中代表自变量系数的 m 值可以由因子得分系数矩阵中得到,并根据因子得分系数和原始变量的观测值(即自变量 x) 可以计算出各个退耕模式在求出的主成分因子上的得分,用 Fi 表示。

1.2.4 耦合关系模型构建

由于林地结构与生态功能的耦合作用的交错性与复杂性,同时考虑两个子系统的关联性,本文采用能较为全面分析两系统多因素交互作用的灰色关联度模型^[20]。以便对吴起县退耕还林地的结构与生态功能耦合机制进行揭示,见公式(3)。

i 和 j 之间的绝对值关联系数,它表示该样本点的两个子系统要素之间的关联程度。

再次,将关联系数按样本数、求其平均值可以得到一个 $m \times n$ 的关联度矩阵 γ ,它能够从整体上反映林地结构子系统单个指标和生态功能子系统单个指标之间的关联程度。如果 γ_{ij} 值越靠近 1,表明林地

结构系统某指标 $Z_i^L(k)$ 与生态功能系统某指标 $Z_j^I(k)$ 之间的关联性越大,单个指标之间的耦合作用越明显^[21]。

为进一步揭示林地结构与生态功能的交互耦合特征并识别各系统的主要影响因素,在关联度矩阵 γ 基础上,再分别依据公式(4)按行和列进行简单平均,分别得到林地结构系统(L)对生态功能(I)产生约束的主要因素和生态功能(I)对林地生长及土壤条件(L)产生胁迫的主要因素。

$$\begin{cases} d_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \gamma_{ij} & (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \\ d_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \gamma_{ij} & (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (4)$$

式中, d_i 表示林地结构系统(L)第 i 种要素对生态功能(I)的影响关联度, d_j 表示生态功能(I)第 j 种要素对林地结构系统(L)的影响关联度。通过比较各个影响关联度 d_i 和 d_j 的大小,可以分析出林地结构系统中哪些因素对生态功能的约束作用大,以及生态功能中哪些因素对林地结构系统构成主要胁迫作用。

1.2.5 林地结构与生态功能耦合度模型构建

上述系统之间的关联度并不能反映二者耦合程度,为从整体上判别林地结构与生态功能两个系统匹配协调发展态势,需要引入耦合度模型。因此,在式(3)的基础上进一步构造林地结构与生态功能相互匹配的系统耦合度模型^[22],以定量评判样本区林地结构与其生态功能的匹配协调发展程度。其计算公式为:

$$C(k) = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \xi_i(j) (k) \quad (5)$$

2 结果与分析

2.1 林地结构因子分析

由因子主成分分析结果得到,除了林分组成信息损失较大外,主成分几乎包含了各个原始变量至少 85%的信。为排除相关性较强的因子的重复效应,采取主成分因子分析法,得到前四个主成分特征值均>1,特征值累计贡献率达到 90.759%。可以认为,前四个主成分因子代表研究对象的林地结构特征。

通过因子旋转,得到 4 个主成分因子的典型代表变量的因子载荷矩阵,如表 2,由表可得,第一主成分因子主要反映了林地的乔木平均高度、平均胸径、郁闭度、枯落物生物量、冠层截留率,可定义为乔木层林层结构及枯落物指标;第二主成分因子主要反映了林地的枝叶生物量、根系生物量,可定义为林地上层生物量结构指标;第 3 主成分因子主要反映了土壤总孔隙度、土壤毛管孔隙度及枯落物容水量,可以把它作为土壤层相关指标;第四主成分因子主要反映了草本层生物量、土壤稳渗速率,定义为其它指标。

表 2 旋转后的因子载荷矩阵表
Table 2 Rotated component matrixa

因子 Factors	主成分因子 Main factors			
	1	2	3	4
X_1	0.447	-0.643	0.257	0.341
X_2	0.844	-0.038	-0.312	-0.186
X_3	0.892	0.286	0.197	-0.088
X_4	0.879	0.183	0.339	0.267
X_5	0.173	0.947	0.103	0.170
X_6	0.275	0.809	-0.266	0.130
X_7	-0.122	0.167	-0.196	0.877
X_8	0.791	0.259	0.250	0.484
X_9	-0.134	0.104	0.945	0.044
X_{10}	-0.028	-0.465	0.735	0.342
X_{11}	0.788	0.217	-0.387	0.190
X_{12}	0.482	0.792	0.235	0.185
X_{13}	0.509	-0.017	0.794	-0.280
X_{14}	0.419	0.030	0.357	0.807

提取方法:主成分; 旋转法:具有 Kaiser 标准化的正交旋转法

通过建立的林地结构因子分析模型,可以算出 7 个退耕模式的林地结构因子得分指数 F_i ,得到表 3。

根据前文对公共因子的解释,结合各种退耕模式 4 个公共因子上的得分和综合得分,对各种退耕模式的林地结构水平进行评价。根据林地结构因子分析模型得出的主成分因子得分反映了该林地的结构特点,在 F1 乔木层林层结构因子中,得分最高的是刺槐以及刺槐、沙棘混交林;F2 上层生物量因子中,得分最高的是柠条 3.3,远高于其他林地类型;F3 土壤层因子中,得分最高的为沙棘 3.26,远高于其他;F4 草本层及稳渗速率因子中,得分最高的是沙棘和柠条,分别为 2.3、2.29。综合得分最高的为柠条,其值为 3.1。

表 3 不同退耕模式因子得分表

Table 3 Component score coefficient matrix in the grain for green patterns

退耕模式 Grain for green patterns	F1	F2	F3	F4	F
沙棘 <i>Fructus Hippophae</i>	3.678862	1.856102	3.264445	2.202591	2.942925
柠条 <i>Caragana intermedia</i>	3.937344	3.355422	1.10375	2.2906	3.105895
刺槐+沙棘 mixing <i>Robinia pseudoacacia</i> with <i>Fructus Hippophae</i>	4.704132	0.455898	2.837097	1.825067	2.922872
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	4.839142	2.173204	0.461533	1.729543	3.026237
沙棘+山杏 Mixing <i>Siberian Apricot</i> with <i>Fructus Hippophae</i>	3.718363	0.402365	1.996571	2.84571	2.477254
山杏 <i>Siberian Apricot</i>	1.267153	0.576546	1.001882	-0.08426	0.860565
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	0.020211	-0.04655	0.722445	1.189103	0.27864

2.2 结构因子与生态功能耦合关联分析

根据公式(4)将林地结构因子与生态功能因子进行灰色关联分析,得到表 4。

从表中可以看出,林地结构因子与生态功能因子之间的联系与反馈是密切的,经过计算得出两要素各项因子之间的关联度都在 0.5 以上,属于中等关联程度,表明结构因子与生态功能之间有较强的耦合特性,为进一步揭示两因素之间交互耦合的机制及主要驱动力、胁迫力,将计算结果在同一层次上进行简单平均(见平均值一栏),则分别得到各林地结构因子对生态功能胁迫的主要作用因素和生态功能对林地结构因子的主要反馈作用,以及二者之间的相互耦合关系。

林地结构因子对生态功能的作用明显表现在地表径流量的改变,各因子对地表径流的平均关联系

数为 0.67,远大于对土壤侵蚀率的系数,这很可能与径流对土壤侵蚀的影响有关,径流量的大小与强度对于土壤侵蚀率是有因果关系的。林分组成、冠层截留率、枯落物生物量、草本层截留率以及草本层生物量对地表径流的影响尤为明显,关联系数都在 0.7 以上,在林地结构因子分析中,分属于主成分 F1、F2、F4;而土壤总孔隙度、土壤毛管孔隙度则对径流影响较小,系数均小于 0.6,说明主成分 F4 土壤因子对地表径流作用不明显。

从土壤侵蚀率与林地结构因子关联系数中可以看出,草本层生物量和枯落物生物量对土壤侵蚀率的作用较为明显,系数分别为 0.72 和 0.64,其他因子与土壤侵蚀率的关联系数均低于 0.6。可以看出接近地表的覆盖度对于减少降雨对于地表的破坏和侵蚀有明显的作用,这与实际情况也是相符合的。

表 4 吴起县退耕还林地林地结构与生态功能耦合作用矩阵

Table 4 The matrix of forest structure and ecological function coupling in the grain for green patterns

生态因子 Ecological function factors	林地结构因子 Forest structure factors														平均值 Mean value
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
	林地 林分	平均 高度	平均 胸径	郁闭度	枝叶 生物量	根系 生物量	草本层 生物量	枯落物 生物量	土壤总 孔隙度	土壤 毛管 孔隙度	冠层 截留率	草本层 截留率	枯落物 容水量	土壤稳 渗速率	
土壤侵蚀 Soil erosion	0.50	0.50	0.50	0.50	0.51	0.51	0.72	0.64	0.50	0.50	0.52	0.53	0.52	0.50	0.53
地表径流 Runoff	0.74	0.70	0.58	0.65	0.65	0.62	0.71	0.85	0.57	0.59	0.74	0.74	0.62	0.61	0.67
平均值 Mean value	0.62	0.60	0.54	0.57	0.58	0.56	0.71	0.74	0.53	0.55	0.63	0.63	0.57	0.56	0.60

林地林分 Forest component; 平均高度 Average height; 平均胸径 mean Breast-height diameter; 郁闭度 Crown density; 枝叶生物量 The mass of branches; 根系生物量 The mass of roots; 草本层生物量 The mass of herb layer; 枯落物生物量 The mass of litter layer; 土壤总孔隙度 Total porosity percent; 土壤毛管孔隙度 Capillary porosity; 冠层截留率 The canopy interception rate; 草本层截留率 The herb layer interception rate; 枯落物容水量 The litter water holding capacity; 土壤稳渗速率 The soil stable infiltration rate

2.3 林地结构与生态功能耦合度分析

上述系统之间的关联度并不能完全反映二者耦合程度,为从整体上判别林地结构与生态功能两个系统匹配协调发展程度,需要测度系统耦合度,将灰色关联度系数带入公式(5),得到系统耦合度,表6展示了整个样本区各退耕类型林地结构功能系统耦合的匹配协调程度。如果取最大值 $C(k) = 1$,则说

明明林地结构与生态功能的耦合处于完全匹配协调状态,如果取最小值 $C(k) = 0$,表明系统处于完全不匹配协调状态。目前耦合协调度等级划分尚无同一的标准,参考前人的研究成果^[23-24],采用目前国际性组织普遍采纳的系统协调度评价标准如表5所示。

表5 系统耦合协调度标准

Table 5 Standard of ecosystem coordination

协调度 Standard of ecosystem	$0 \leq C \leq 0.4$	$0.4 \leq C \leq 0.5$	$0.5 \leq C \leq 0.6$	$0.6 \leq C \leq 0.7$	$0.7 \leq C \leq 0.8$	$0.8 \leq C \leq 0.9$	$0.9 \leq C \leq 1.0$
协调评价 Type of ecosystem coordination	严重不协调	中度不协调	轻度不协调	弱协调	中度协调	良好协调	优质协调

资料来源:OECD(OECD 2003)

从表中可以看出,7种不同退耕还林模式的林地结构与生态功能的系统协调度并不完全一致,其中协调度指数沙棘纯林>沙棘山杏混交林>柠条纯林>刺槐沙棘混交林>刺槐纯林>山杏纯林>油松纯林,只有沙棘纯林和沙棘山杏混交林的耦合度值高于0.7,处于中度协调型,结合主成分得分系数表的结果,发现沙棘纯林和沙棘山杏混交林的 F 值也较高,充分说明沙棘树种在该地区的适应性较好,其生长状况有明显优势且与生态功能协调度较好,可以考虑在今后退耕工程建设中扩大其种植面积。

其他退耕模式均未实现良好的协调度,尤其油

松属于严重不协调型,由前文的各退耕类型的因子得分系数中可以看出,油松的因子得分 F 值最低,且其各项因子得分均明显低于其他树种,说明油松生长状况不良且其几乎对地表径流及土壤侵蚀的改善没有起到明显作用。

通过计算所有样本整体,得到吴起县退耕还林地林地结构和生态功能的综合耦合度为0.6,系统耦合发展处于一种弱协调态势。可见在退耕还林工程中,林地自身结构的优化与生态功能的实现还未想成良好的协同状态,仍需要进一步改良探索。

表6 不同退耕还林模式林地结构与生态功能系统耦合协调状况评判结果

Table 6 Evaluation results of ecosystem coordination in the grain for green patterns

模式 Grain for green patterns	C	耦合协调类型 Type of ecosystem coordination
柠条 <i>Caragana intermedia</i>	0.68	弱协调 Light coordination
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	0.39	严重不协调 Serious ncoordination
沙棘 <i>Fructus Hippophae</i>	0.73	中度协调 Middle coordination
沙棘、山杏 mixing <i>Siberian Apricot with Fructus Hippophae</i>	0.71	中度协调 Middle coordination
山杏 <i>Siberian Apricot</i>	0.45	中度不协调 Middle incoordination
刺槐、沙棘 mixing <i>Robinia pseudoacacia with Fructus Hippophae</i>	0.65	弱协调 Light coordination
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	0.63	弱协调 Light coordination

C 为退耕还林林地结构与生态功能系统耦合度

3 结论与讨论

(1)林地结构与生态功能要素的耦合机制是复杂的,总体上表现在林地结构的差异对生态功能的约束作用,通过灰色关联分析表明:林地结构因子总体上对地表径流量大小的影响大于对土壤侵蚀率的

影响。林分组成对于地表径流影响非常明显,结合调查数据可以得出,混交林的地表径流量小于其相应纯林的地表径流量,如沙棘+山杏混交林的地表径流量要小于沙棘纯林、山杏纯林的地表径流;其次是冠层截留率、草本层截留率也对径流量有明显影响,截留率越大的退耕模式,地表径流越小;枯落物生物

量以及草本层生物量对地表径流也有比较明显的作用,枯落物生物量以及草本层生物量越大的林地,其地表径流相越小;土壤相关因子与地表径流的关联系数最小,这可能是由于土壤相关因子的性质除了受退耕类型本身树种不同的影响,还受人为活动的影响较大,而人为活动相关因子不在本次研究指标体系内,所以土壤因子在生态功能中的作用还有待更细致的研究。由土壤侵蚀率与各林地结构因子的关联系数可以看出,草本层生物量、枯落物生物量等近地表的相关结构对土壤侵蚀的作用很明显。

(2)不同退耕模式林地结构与生态功能的系统耦合在协调度上表现出差异,其中只有沙棘纯林和沙棘、山杏混交林的耦合协调度较高,处于中度协调状态,油松纯林的耦合协调度最低。结合各退耕模式的因子得分系数矩阵,可以看出,油松纯林在吴起县退耕还林工程中的生态效益较低,在林地配置上需要改善。而在今后的退耕还林工程的后续建设中,可考虑将沙棘纯林与沙棘山杏混交林作为该地区的生态适宜模式,进行积极的推广。吴起县退耕还林地的综合耦合度仅为 0.6,处于弱协调状态,这表明目前吴起县退耕区林地结构与相应生态功能之间并没有完全实现合理匹配与协调,需要进一步调整。

(3)目前耦合系统多应用于生态经济系统耦合的建立,单纯用于探索森林结构与功能关系的研究较少。本研究将耦合系统的概念引入对退耕还林地的林地结构与功能之间的研究,是退耕还林工程相关研究中的一个探索性尝试,有明显创新意义。从以上结果来看,该分析方法有以下几个特点:一是通过主成分的简化,因子整合后生态意义明确,有利于明确影响生态功能的主要因素;二是,该模型为量化模型,其减少了评价过程中主观判断的影响,结果更加客观。但是对于因子的选择以及评判标准的合理性,还处于尝试阶段,需要今后再做更多的分析以修正和完善。

(4)影响退耕还林地生态功能的因子是多方面的,由森林生态系统所独具的复杂的结构、功能特性决定了其生态功能的大小是由多个影响因素相互联系、共同作用的结果,所以,在探讨问题时既要有要单因子的细致深入的研究,也应该从系统整体的角度做判断,二者相互补充,最终为退耕还林工程的后

续建设做理论指导。

References:

- [1] Li J G, He C Y, Shi P J, Chen J, Fu Z H, Xu W. Change process of cultivated land and its driving forces in Northern China during 1983—2001. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59 (2): 274-282.
- [2] Fu B J, Qiu Y, Wang J, Chen L X. Effect simulations of land use change on the runoff and erosion for a gully Catchment of the loess plateau, China. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57 (6): 717-722.
- [3] Li Q R, Wang J J, Guo M C. Coupling relationship of ecological agricultural system of commodities in Ansai county based on structural equation model. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28 (16): 240-247.
- [4] Zhou Y, Wei T X, Xie J Q, Shi X, Ge G B, Dong Z, Cheng Z Q. Different types of vegetation cover and water conservation benefits. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25 (3): 12-21.
- [5] Ji Y Z, Zhao Z. Optimum vegetation recovery model of conversion of farmland to forest (grassland) cost effective mode suitable for Jingchuan of Gansu Province. *Research of Water and Soil Conservation*, 2009, 16 (4): 142-145.
- [6] Gong J, Chen L D, Fu B J, Li Y M, Huang Z L, Huang Y L, Peng H J. Effects of land use and vegetation restoration on soil quality in a small catchment of the Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15 (12): 2292-2296.
- [7] Zhu H L, Yang G H, Han X H. Variation characteristics of hydrological features in Ansai County. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2011, 39 (8): 178-184.
- [8] Lu S Y, Peng W X, Song Q T, Zeng F P, Du H, Wang K L. Soil microbial properties under different grain for green patterns in depressions between karst hills. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 32 (8): 2390-2399.
- [9] Peng W X, Song T Q, Zeng F P, Wang K L, Du H, Lu S Y. Models of vegetation and soil coupling coordinative degree in grain for green project in depressions between karst hills. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27 (9): 305-310.
- [10] Zhang Y L, Li H E, Zhang X C, Meng Q X. Review on the mixing zone depth of rainfall-runoff-soil interaction. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23 (9): 283-290.
- [11] Lu S W, Chen J H, Yu X X, Xing W F, Lu S B, Wang Y H, Wang P. Studys on configuration and function of forests in rocky mountain area of Northern China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21 (4): 77-80, 84-84.
- [12] Jiang Z L. *Forest Ecology* (5): Water and soil conservation forest ecosystem function (1). *Chinese Journal of Ecology*, 1985, 2: 59-63.
- [13] Shi Z J, Wang Y H, Yu P T, Xiong W, Guo H, Guo M C. Study on different forestry vegetation' s eco-hydrological function in Liupan Mountain of Ningxia China. *Journal of Soil and Water*

- Conservation, 2005, 19(3): 23-28.
- [14] Shi Q, Yu X X, Guo H, Yang A R. Analysis and evaluation on function of different forest types on water resources protection. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2004, 8(4): 31-33.
- [15] Xiao Y, Chen L H, Yu X X, Yang X B, Sun Q Y. Influence on precipitation distribution of pinus tabulaeformis forest in Miyun reservoir. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(3): 154-157.
- [16] Xu L H, Shi Z J, Wang Y H, Xiong W, Yu P T. Canopy interception characteristics of main vegetation types in Liupan Mountains of China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(10): 2487-2493.
- [17] He B, Qin W M, Dai J, Liu F, Huang Y. Study on function and value of water conservation in different age classes of *Acacia Mangium* Plantations. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(5): 5-8, 27-27.
- [18] Xu J. Ecological Functions of Forest Floor in Forest Ecosystems in Beijing Mountain Area [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010.
- [19] Ye J, Hao Z Q, Jiang P. Studies on rainfall holding process of the bryophyte and litter layer in coniferous forest of Changbai Mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 24(12): 2859-2862.
- [20] Song H W, Lu S M. Study on repairing permanent transportation roadway in deep mining by bolt-shotcrete and mesh supporting. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1999, 9(2): 167-171.
- [21] Wang Y J. Grain-For-Green and Agricultural Land Resource-Industry System Coupling in Loess Hilly Region [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2010.
- [22] Liu Y B, Song X F. Study of coupling characteristics between regional urbanization and eco-environment — Taking Jiangsu Province a case. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2006, 3(2): 182-187.
- [23] Wang M Q, Wang J D, Liu J S. Analysis of the coupling between resource-environment and Population-economy in West Jilin Province. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(2): 167-172.
- [24] Sun A J, Dong Z C, Zhang X Y. Coupling degree between urban economy and technical efficiency of water use in China. *Resources Science*, 2008, 30(3): 446-453.
- [4] 周毅, 魏天兴, 解建强, 石鑫, 葛根巴图, 董哲, 程中秋. 黄土高原不同林地类型水土保持效益分析. *水土保持学报*, 2011, 25(3): 12-16, 21-21.
- [5] 季元祖, 赵忠. 适宜于泾川县退耕还林(草)植被恢复的优化模式. *水土保持研究*, 2009, 16(4): 142-145.
- [6] 巩杰, 陈利顶, 傅伯杰, 李延梅, 黄志霖, 黄奕龙, 彭鸿嘉. 黄土丘陵区小流域土地利用和植被恢复对土壤质量的影响. *应用生态学报*, 2004, 15(12): 2292-2296.
- [7] 朱会利, 杨改河, 韩新辉. 陕北安塞县水文要素变化特征分析. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2011, 39(8): 178-184.
- [8] 鹿士杨, 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 杜虎, 王克林. 喀斯特峰丛洼地不同退耕还林还草模式的土壤微生物特性. *生态学报*, 2012, 32(8): 2390-2399.
- [9] 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 王克林, 杜虎, 鹿士杨. 喀斯特峰丛洼地退耕还林还草工程的植被土壤耦合协调度模型. *农业工程学报*, 2011, 27(9): 305-310.
- [10] 张亚丽, 李怀恩, 张兴昌, 孟庆香. 降雨-径流-土壤混合层深度研究进展. *农业工程学报*, 2007, 23(9): 283-290.
- [11] 鲁绍伟, 陈吉虎, 余新晓, 刑文发, 鲁少波, 王玉华, 王攀. 华北土石山区不同林分结构与功能的研究. *水土保持学报*, 2007, 21(4): 77-80, 84-84.
- [12] 姜志林. 森林生态学(五): 森林生态系统蓄水保土的功能(1). *生态学杂志*, 1984, 6: 58-61.
- [13] 时忠杰, 王彦辉, 于澎涛, 熊伟, 郭浩, 郭明春. 宁夏六盘山区集中主要森林植被生态水文功能研究. *水土保持学报*, 2005, 19(3): 23-28.
- [14] 石青, 余新晓, 郭浩, 杨爱荣. 不同类型水源保护林水资源保护功能的分析和评价. *水土保持通报*, 2004, 24(4): 31-33.
- [15] 肖洋, 陈丽华, 余新晓, 杨新兵, 孙庆艳. 北京密云水库油松人工林对降水分配的影响. *水土保持学报*, 2007, 21(3): 154-157.
- [16] 徐丽宏, 时忠杰, 王彦辉, 熊伟, 于澎涛. 六盘山主要植被类型冠层截留特征. *应用生态学报*, 2010, 21(10): 2487-2493.
- [17] 何斌, 秦武明, 戴军, 刘峰, 黄勇. 马占相思人工林不同年龄阶段水源涵养功能及其价值研究. *水土保持学报*, 2006, 20(5): 5-8, 27-27.
- [18] 徐娟. 北京山区典型森林枯落物层生态功能研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [19] 叶吉, 郝占庆, 姜萍. 长白山暗针叶林苔藓枯落物层的降雨截留过程. *生态学报*, 2004, 24(12): 2859-2862.
- [21] 汪阳洁. 黄土丘陵区退耕还林对农地资源产业系统耦合的影响研究—农户决策的视角 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [22] 刘耀彬, 宋学锋. 区域城市化与生态环境耦合性分析——以江苏省为例. *中国矿业大学学报*, 2006, 3(2): 182-187.
- [23] 王明全, 王金达, 刘景双. 吉林省西部资源环境和人口经济发展的耦合性分析. *水土保持通报*, 2008, 28(2): 167-172.
- [24] 孙爱军, 董增川, 张小艳. 中国城市经济与用水技术效率耦合协调度研究. *资源科学*, 2008, 30(3): 446-453.

参考文献:

- [1] 李景刚, 何春阳, 史培军, 陈晋, 辜智慧, 徐伟. 近20年中国北方13省的耕地变化与驱动力. *地理学报*, 2004, 59(2): 274-282.
- [2] 傅伯杰, 邱扬, 王军, 陈利顶. 黄土丘陵小流域土地利用变化对水土流失的影响. *地理学报*, 2002, 57(6): 717-722.
- [3] 李奇睿, 王继军, 郭满才. 基于结构方程模型的安塞县商品型生态农业系统耦合关系. *农业工程学报*, 2012, 28(16): 240-247.